

УДК 621.771.014

Найзабеков А. Б.
Лежнев С. Н.
Койнов Т. А.
Панин Е. А.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ СПОСОБОМ «ПРОКАТКА – РКУ-ПРЕССОВАНИЕ»

За последние два десятилетия было разработано большое число способов обработки давлением, позволяющих получать заготовки с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Как показал их анализ, в их основе лежат принципы реализации сдвиговых или знакопеременных деформаций. Отдельно стоит упомянуть о процессах, представляющих собой комбинацию сдвиговых и знакопеременных деформаций. В целом, все эти процессы позволяют реализовать особый вид обработки давлением, который называется «интенсивная пластическая деформация (ИПД)».

Получение этим методом УМЗ структуру возможно при следующих условиях [1]:

- 1) реализация высоких степеней деформации для измельчения зерна ($e > 4$);
- 2) обеспечение высокого гидростатического давления, которое препятствует разрушению образца (1 ГПа и выше);
- 3) деформация при температурах около 0,4 от температуры плавления и ниже для предотвращения рекристаллизации;
- 4) обеспечение немонотонности деформации, что способствует формированию высокоугловых межзеренных границ.

Получить похожие условия можно деформируя металл такими методами, как равноканальное угловое (РКУ) прессование, винтовая прокатка и другие.

Способ равноканального углового прессования позволяет получать образцы круглого, квадратного или прямоугольного сечения с однородной УМЗ структурой при размере зерен 100–200 нм и не требует сложного оборудования. Способ состоит в продавливании заготовки через угловой канал матрицы и реализует схему простого сдвига. Наиболее полно технология РКУП и различных его вариаций обобщена и изложена в работе [2], а также в работах [3–5]. Особое внимание заслуживает ступенчатая РКУ матрица (или РКУ-матрица с параллельными каналами) [6] (рис. 1), позволяющая реализовать не только сдвиговую деформацию при прохождении заготовки через ее каналы, но и одновременно с этим два знакопеременных очага деформации, при условии сонаправленности входного и выходного каналов. Данная схема также является энергосберегающей, поскольку позволяет реализовать большую степень деформации за один проход при одинаковом усилии.

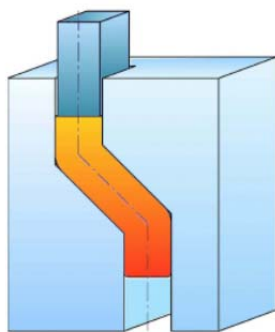


Рис. 1. РКУП в матрице с параллельными каналами

Вышеуказанные методы относятся к дискретным методам прессования. Проанализировав эти методы получения УМЗ материалов, можно сделать вывод, что из-за высокого энергопотребления ни один из этих методов не готов к широкому промышленному применению. Эти технологии имеют ряд недостатков, основными из которых являются дискретность (прерывность) процесса и реализация прессования с наличием реактивных сил трения на контакте металла с контейнером. Это приводит к ограничению по длине заготовки, снижению их качества за счет неравномерной деформации и высокой потребляемой мощности процесса прессования. Устранение этих недостатков возможно за счет использования схем непрерывного прессования.

Среди этих способов особое место занимает способ Конформ. Он имеет ряд технических и экономических преимуществ и широкую сферу применения. В работах [7–9] приведен анализ технологии и оборудования непрерывного прессования, а также результаты исследований в этой области. Способ Конформ основан на применении неподвижного инструмента, называемого башмаком и подвижного вращающегося инструмента типа колеса с канавкой по периферии, причем в торце башмака установлена матрица, которая перекрывает канавку колеса.

В работе [10] представлены результаты исследований процесса винтовой прокатки. Винтовая прокатка позволяет развить очень высокую степень деформации за 2–3 прохода, что достаточно для формирования УМЗ структуры, но только в периферийной части заготовки, с преобладанием ламинарного течения металла и, следовательно, с ориентированной пластинчатой структурой в центральной части стержня. Этот факт проиллюстрирован исследованием [11]. Чтобы обойти этот недостаток винтовой прокатки, объединить винтовую прокатку с РКУП в единый процесс. В этом случае пруток уже получает интенсивную деформацию в валках винтового стана, также получает деформацию кручения сразу после выхода валков перед РКУ-матрицей, а затем перпендикулярно оси стержня получит знакопеременную деформацию сдвига в равноканальной угловой матрице. Это позволяет решить проблему неравномерной проработки структуры прутка и значительно повысить общую производительность и эффективность процесса. Концептуальная схема этого комбинированного процесса приведена на рис. 2.

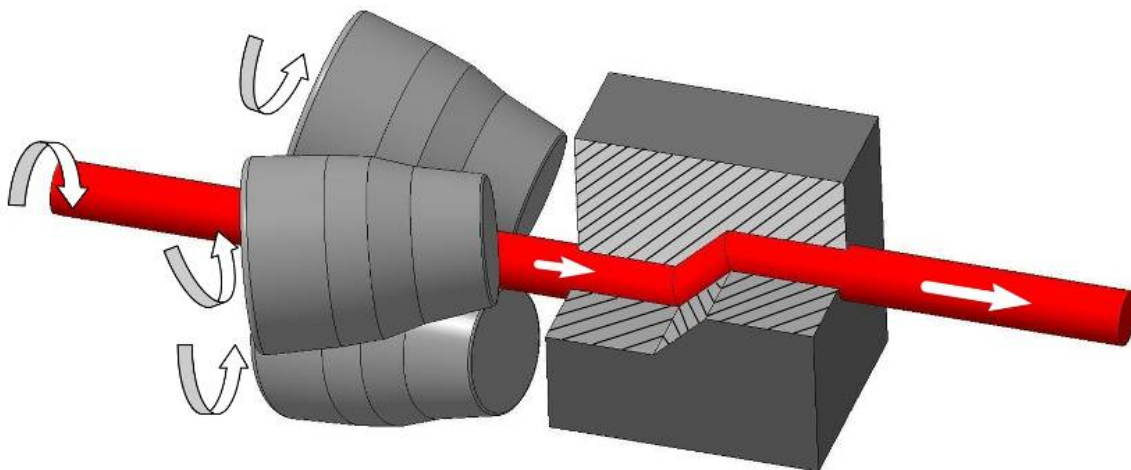


Рис. 2. Схема процесса «винтовая прокатка – РКУ-прессование»

Описанный способ совмещения винтовой прокатки с РКУП может быть использован для получения заготовок круглого сечения. Для деформирования некруглых заготовок нами был разработан и предложен комбинированный метод прокатки и прессования в равноканальной матрице с параллельными каналами (рис. 3), который по сравнению с обычным прессованием в равноканальной угловой матрице снимает ограничения на начальные размеры заготовки [12–13].

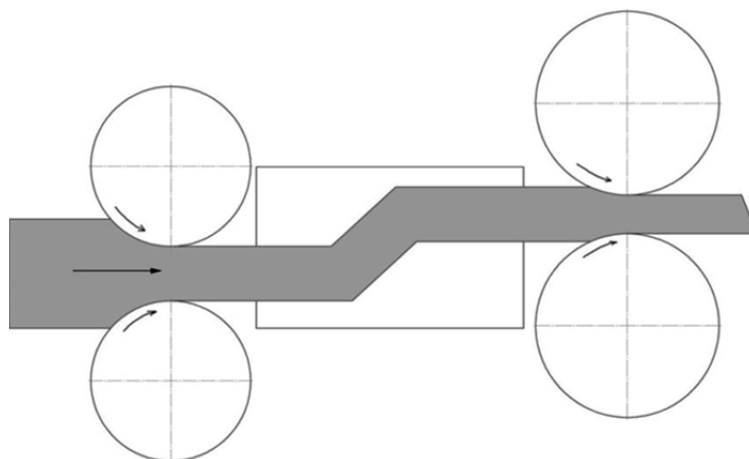


Рис. 3. Комбинированный метод «прокатка-РКУП»

Суть этого метода деформации заключается в следующем. Заготовка нагревается до температуры начала деформации. Затем ее подают в валки, которые за счет контактных сил трения захватывают ее, а на выходе из него проталкивают через каналы матрицы. То есть, в данном случае, процесс прессования заготовок в матрице осуществляется за счет использования контактных сил трения, которые возникают на контактной поверхности металла с вращающимися валками. Когда заготовка полностью выйдет из матрицы, она захватывается второй парой валков, которые полностью извлекают заготовку из матрицы. Преимуществом данного способа является то, что предложенная схема обеспечивает непрерывность процесса и снимает ограничения на размеры исходных заготовок.

При изучении любого процесса деформирования ключевым положением перед лабораторными или производственными испытаниями является изучение деформированного состояния. Для определения значений деформации необходимо найти значения составляющих соответствующих тензоров, которые для трехмерного потока металла очень сложно визуализировать. Поэтому обычно используются простые показатели интенсивности деформации, называемые эквивалентными деформациями, которые включают компоненты главных деформаций в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

Предлагаемая комбинированная технология включает в себя два различных вида деформирования – прокатку и РКУП. Согласно работе [2], эквивалентная деформация после одного прохода в матрице с параллельными каналами может быть выражена в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{РКУП}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right], \quad (2)$$

где Φ – угол стыка каналов;

Ψ – угол дуги скругления каналов (при отсутствии скруглений на стыках он равен 0).

При прокатке, согласно работе [14], эквивалентная деформация может быть выражена в следующей простой форме:

$$\varepsilon_{\text{ПРОК}} = 1,15 \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (3)$$

где h_0 – высота заготовки перед прокаткой;

h_1 – высота заготовки после прокатки.

Исследование деформированного состояния проводили с помощью программы DEFORM. все необходимые геометрические и технологические параметры были найдены с помощью программы, описанной в работе [12], основной целью которой является определение оптимальных значений этих параметров для стабильного протекания процесса. В результате была построена следующая модель:

- исходная заготовка имела поперечное сечение с размерами 15×25 мм;
- материал заготовки – алюминиевый сплав 6063;
- реологические свойства материала взяты из базы материалов DEFORM;
- угол Φ был равен 140° ; угол Ψ равен 20° ;
- коэффициент трения на контакте заготовки и валков равнялся 0,5;
- коэффициент трения на контакте заготовки и матрицы равен 0,1;
- радиус 1-й пары валков был 100 мм; радиус 2-й пары валков был 110 мм;
- угловая скорость обеих пар валков 60 об/мин;
- тип материала – упруго-пластический;
- начальная температура заготовки составила 20°C .

Значения радиусов и угловых скоростей соответствовали реальным значениям лабораторного стенда.

Параметры процесса деформации были следующими:

– заготовка высотой 15 мм прокатывалась на 3 мм в первой паре валков, проходила через матрицу с каналом высотой 13 мм, а затем прокатывалась на 3 мм во второй паре валков. В результате размеры поперечного сечения заготовки составили $10 \times 28,7$ мм.

Было решено проанализировать следующий этап деформации: заготовка прокатывается в первой паре валков, перемещается по каналам матрицы, а затем прокатывается во второй паре валков. На данном этапе деформации имеется возможность изучения деформационного состояния во всех зонах деформации (рис. 4).

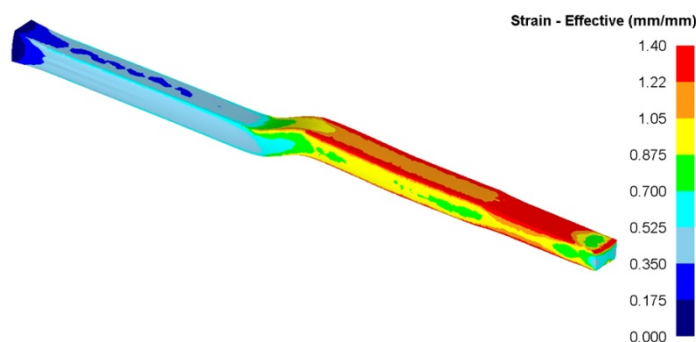


Рис. 4. Эквивалентная деформация при моделировании в DEFORM

В табл. 1 представлены значения эквивалентной деформации после моделирования деформации и расчета с использованием уравнений (2) и (3).

Таблица 1

Значения эквивалентной деформации

	После прокатки в 1-ой паре валков	После РКУП	После прокатки во 2-ой паре валков
Расчет	0,256	1,073	1,374
Моделирование	0,28	1,082	1,4

Как видно, результаты расчета и моделирования имеют хорошую сходимость. Но из работы [2] известно, что для получения УМЗ структуры необходимо достичь значения

эквивалентной деформации $\varepsilon > 4$. Так, согласно представленной схеме деформации, необходимо выполнить 3 прохода. Параметры деформационного процесса на 2-м и 3-м проходах были следующими:

– 2-й проход: заготовка высотой 10 мм прокатывалась на 3 мм в первой паре валков, проходила через матрицу с каналом высотой 8 мм, а затем прокатывалась на 1 мм во второй паре валков. После второго прохода размеры поперечного сечения заготовки составляли $7 \times 30,4$ мм.

– 3-й проход: заготовка высотой 7 мм прокатывалась на 2 мм в первой паре валков, проходила через матрицу с каналом высотой 6 мм, а затем прокатывалась на 1 мм во второй паре валков. После третьего прохода размеры поперечного сечения заготовки составляли $5 \times 32,2$ мм.

В табл. 2 представлены значения эквивалентной деформации после моделирования в DEFORM и расчета для всех проходов.

Таблица 2

Значения эквивалентной деформации после всех проходов

	После 1-го прохода	После 2-го прохода	После 3-го прохода
Расчет	1,374	2,755	4,168
Моделирование	1,4	2,84	4,22

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты изучения деформированного состояния при моделировании совмещенного процесса «прокатка – РКУ-прессование». Для анализа деформированного состояния использовались известные аналитические формулы, позволяющие найти величину эквивалентной деформации после прокатки и РКУ-прессования, а также результаты моделирования в DEFORM. Исследование эквивалентной деформации показало, что после 3-х проходов предлагаемого комбинированного процесса можно достичь величины эквивалентной деформации, необходимой для получения УМЗ структуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // *Prog. Mater. Sci.* – 2000. – № 45(2). – P. 103–189.
2. Valiev R. Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – № 51. – P. 881–981.
3. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment / M. H. Shaeri, M. T. Salehi, S. H. Seyyedein, M. R. Abutalebi, J. K. Park // *Mater. Des.* – 2014. – № 57. – P. 250–257.
4. Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing / Xiaohua Zhang, Xiaojing Liu, Jingze Wang, Yuansheng Cheng // *Mater. Sci. Eng. – A*, 2016. – № 676. – P. 65–72.
5. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature / W. Wei, S. L. Wang, K. X. Wei, I. V. Alexandrov, Q. B. Du, J. Hu // *J. Alloys Compd.* – 2016. – P. 678. – P. 506–510.
6. Naizabekov A. B. Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die / A. B. Naizabekov, S. N. Lezhnev, I. E. Volokitina // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2015. – № 57(5–6), P. 254–260.
7. Chembarisova R. G. Simulation of the Elastoplastic Behavior of Grade-4 Ti in the ECAP-C Process / R. G. Chembarisova, I. V. Aleksandrov // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2016. – № 58(3–4). – P. 236–244.
8. Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-conform processing and drawing / D. V. Gunderov, A. V. Polyakov, I. P. Semenova, G. I. Raab, A. A. Churakova, E. I. Gimaltdinova et al. // *Mater. Sci. Eng. – A*, 2013. – № 562. – P. 128–136.
9. Computer study of the effect of tooling geometry on deformation parameters in the plastic shaping of aluminum wire rod by Multi-ECAP-Conform / G. I. Raab, E. I. Fakhretdinova, R. Z. Valiev, L. P. Trifonenkov, V. F. Frolov // *Metallurgist.* – 2016. – № 59(11–12). – P. 1007–1014.
10. Lopatin N. V. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure / N. V. Lopatin, G. A. Salishchev, S. P. Galkin // *Russ. J. Non. Ferr. Met.* – 2011. – № 52(5). – P. 442–447.

11. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys / A. B. Naizabekov, S. N. Lezhnev, H. Dyja, T. Bajor, K. Tsay, A. Arbuz, et al. // *Metalurgija*. – 2017. – № 56(1–2). – P. 199–202.
12. Theoretical grounds of the combined “rolling - equal - channel step pressing” process, / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, and T. Koinov // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2016. – № 51(5). – P. 594–602.
13. New Combined Technology of Deformation “Rolling-Equal Channel Angular Pressing” / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Allowing to obtain metals and alloys with sub-ultra-fine-grained structure, severe plastic deformation techniques*. – M. Cabibbo (Ed.), *InTech*, (2017). – DOI: 10.5772/intechopen.68663.
14. *Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник* / В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртладзе, В. А. Горелов, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова ; под ред. В. С. Кушнера. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. – 520 с.

REFERENCES

1. Valiev R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // *Prog. Mater. Sci.* – 2000. – № 45(2). – P. 103–189.
2. Valiev R. Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – № 51. – P. 881–981.
3. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment / M. H. Shaeri, M. T. Salehi, S. H. Seyyedein, M. R. Abutalebi, J. K. Park // *Mater. Des.* – 2014. – № 57. – P. 250–257.
4. Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing / Xiaohua Zhang, Xiaojing Liu, Jingze Wang, Yuansheng Cheng // *Mater. Sci. Eng. – A*, 2016. – № 676. – P. 65–72.
5. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature / W. Wei, S. L. Wang, K. X. Wei, I. V. Alexandrov, Q. B. Du, J. Hu // *J. Alloys Compd.* – 2016. – P. 678. – P. 506–510.
6. Naizabekov A. B. Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die / A. B. Naizabekov, S. N. Lezhnev, I. E. Volokitina // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2015. – № 57(5–6), P. 254–260.
7. Chembarisova R. G. Simulation of the Elastoplastic Behavior of Grade-4 Ti in the ECAP-C Process / R. G. Chembarisova, I. V. Aleksandrov // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2016. – № 58(3–4). – P. 236–244.
8. Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-conform processing and drawing / D. V. Gunderov, A. V. Polyakov, I. P. Semenova, G. I. Raab, A. A. Churakova, E. I. Gimaltdinova et al. // *Mater. Sci. Eng. – A*, 2013. – № 562. – P. 128–136.
9. Computer study of the effect of tooling geometry on deformation parameters in the plastic shaping of aluminum wire rod by Multi-ECAP-Conform / G. I. Raab, E. I. Fakhretdinova, R. Z. Valiev, L. P. Trifonenkov, V. F. Frolov // *Metallurgist.* – 2016. – № 59(11–12). – P. 1007–1014.
10. Lopatin N. V. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure / N. V. Lopatin, G. A. Salishchev, S. P. Galkin // *Russ. J. Non. Ferr. Met.* – 2011. – № 52(5). – P. 442–447.
11. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys / A. B. Naizabekov, S. N. Lezhnev, H. Dyja, T. Bajor, K. Tsay, A. Arbuz, et al. // *Metalurgija*. – 2017. – № 56(1–2). – P. 199–202.
12. Theoretical grounds of the combined “rolling - equal - channel step pressing” process, / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, and T. Koinov // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2016. – № 51(5). – P. 594–602.
13. New Combined Technology of Deformation “Rolling-Equal Channel Angular Pressing” / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Allowing to obtain metals and alloys with sub-ultra-fine-grained structure, severe plastic deformation techniques*. – M. Cabibbo (Ed.), *InTech*, (2017). – DOI: 10.5772/intechopen.68663.
14. *Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник* / В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртладзе, В. А. Горелов, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова ; под ред. В. С. Кушнера. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. – 520 с.

Найзабеков А. Б. – д-р техн. наук, проф. РИИ;
Лежнев С. Н. – канд. техн. наук, доц. РИИ;
Койнов Т. А. – д-р техн. наук, проф. ХТМУ;
Панин Е. А. – PhD, ст. преп. КГИУ.

РИИ – Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан.

ХТМУ – Химико-технологический и металлургический университет, г. София, Болгария.

КГИУ – Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан.

E-mail: Sergey_legnev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2017 г.